МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 621.313.12-883:629.12.037.4-83
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

О перспективах развития судовых пропульсивных установок в соответствии с экологическими нормами международной конвенции MARPOL-73/78

А. Н. Рак ✉
Камчатский государственный технический университет, (г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация)
✉ lion15ua@rambler.ru

Аннотация

Введение. В судоходной отрасли уделяется большое внимание безопасности техногенных и природных систем. При этом предъявляются повышенные требования не только к качественному составу топлива, но и к выбросам выхлопных газов. В настоящее время Приложение VI конвенции MARPOL-73/78 ратифицировано многими ее подписантами. Соответствие данному документу требует, чтобы выбросы двигателей соответствовали заданным ограничениям уровня NO_x. До недавнего времени такие правила, в основном, действовали в Балтийском и Северном морях, но со временем соблюдение экологических норм коснется и других районов мореплавания.

Цель работы — путем исследования современных технических решений показать, что для решения практических задач экологии необходим комплексный подход, который позволит разрабатывать рациональные схемы современных судовых пропульсивных установок с учетом их соответствия требованиям безопасности техногенных и природных систем.

Материалы и методы. В работе использовались методики и рекомендации, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям Международной морской организации (IMO). Проанализирован и обобщен опыт ведущих зарубежных фирм и отечественных предприятий в части современных конструктивных решений, которые позволят сократить выбросы судов до допустимых пределов.

Результаты исследований. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием факторов, влияющих на разработку рациональных схем судовых пропульсивных установок с учетом их современного уровня развития, ценовой политики и соответствия экологическим требованиям. Показано, что одним из эффективных способов снижения выбросов NO_x является установка на главном двигателе селективного каталитического редуктора (СКР), а для снижения техногенных выбросов — применение эффективных и инновационных электрогенерирующих технологий. В среднесрочной перспективе прогнозируется переход к газообразным видам топлива, а в отдаленной перспективе и к водородным технологиям.

Обсуждение и заключения. Представлены возможные технические решения по сокращению выбросов окислов азота путем установки на главные судовые двигатели селективных каталитических редукторов. Установлено, что одним из перспективных направлений развития являются дизель-электрические гребные установки. Показано, что в среднесрочной перспективе в связи с ужесточением экологических требований произойдет переход на газообразные виды топлива, что позволит с незначительными конструктивными изменениями повысить мощность существующих главных двигателей и сократить выбросы окислов азота и парниковых газов. В отдаленной перспективе переход к водородным топливным элементам при постоянном совершенствовании технологического уровня производства, хранения и развития соответствующей инфраструктуры может рассматриваться в качестве реальной альтернативы углеводородным видам топлива на морском транспорте.

Ключевые слова: главный двигатель, селективный каталитический редуктор, гребная электрическая установка, твердотельный генератор, аккумуляторная система, комбинированная система, топливо.

Для цитирования. Рак, А. Н. О перспективах развития судовых пропульсивных установок в соответствии с экологическими нормами международной конвенции MARPOL-73/78/ А. Н. Рак // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 51–60. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

Original article

On the Prospects for the Development of Marine Propulsion Systems for Their Compliance with the Environmental Standards of the International Convention

Aleksandr N. Rak
Kamchatka State Technical University (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation)
lion15ua@rambler.ru

Abstract
Introduction. The shipping industry pays great attention to the safety of man-made and natural systems. At the same time, increased requirements are imposed not only on the quality of the fuel composition, but also on exhaust emissions. Currently, Annex VI of the MARPOL-73/78 Convention has been ratified by many of its signatories. The compliance with this document requires that engine emissions comply with the specified NO_x level limits. Until recently, such rules were mainly applied in the Baltic and North Seas, but over time, the compliance with environmental standards will affect other areas of navigation.
The work objective is to show through the study of modern technical solutions that we need an integrated approach to solve practical environmental problems, which will allow developing rational schemes of modern marine propulsion systems, taking into account their compliance with the safety requirements of technogenic and natural systems.
Materials and Methods. The methods and recommendations given in open sources and corresponding to the requirements of the International Maritime Organization (IMO) were used in the work. The experience of leading foreign firms and domestic enterprises in terms of modern design solutions that will reduce ship emissions to acceptable limits is analyzed and summarized.
Research Results. The issues related to the study of factors influencing the development of rational schemes of ship propulsion systems, taking into account their current level of development, pricing policy and the compliance with the environmental requirements, are considered. It is shown that one of the effective ways to reduce NO_x emissions is the installation of a selective catalytic reducer (SCR) on the main engine, and the use of efficient and innovative power generation technologies to reduce technogenic emissions. In the medium term, the transition to gaseous fuels is predicted, and in the long term – to hydrogen technologies.
Discussion and Conclusion. Possible technical solutions to reduce emissions of nitrogen oxides by installing selective catalytic reducers on the main marine engines are presented. It is established that one of the promising areas of development are diesel-electric propulsion systems. It is shown that in the medium term, due to stricter environmental requirements, there will be a transition to gaseous fuels, which will allow us with minor structural changes to increase the power of the existing main engines and to reduce emissions of nitrogen oxides and greenhouse gases. In the long term, the transition to hydrogen fuel cells with continuous improvement of the technological level of production, storage and development of the corresponding infrastructure can be considered as a real alternative to hydrocarbon fuels in marine transport.

Keywords: main engines, selective catalytic reducer, electric propulsion system, solid-state generator, battery system, combined system, fuel.

For citation. Rak A. N. On the Prospects for the Development of Marine Propulsion Systems for Their Compliance with the Environmental Standards of the International Convention MARPOL-73/78. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 51−60. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-51-60

Введение. Требования безопасности техногенных и природных систем на морском транспорте повышают внимание к выбросам выхлопных газов. В настоящее время Приложение VI конвенции MARPOL-73/78 [1–3] ратифицировано многими ее подписантами, а, следовательно, все эксплуатирующиеся в настоящее время двигатели должны соответствовать требуемым уровням выбросов NO_x. Например, в районах Балтийского и Северного морей снижение портового сбора используется в качестве стимула использования топлива с низким содержанием серы. Применение современных технологий должно обеспечить требуемый допустимый уровень выбросов и дальнейшее усовершенствование и развитие с целью адаптации к таким ограничениям [1–3].

Ограничения на выбросы могут потребовать разработки новых технологий, но тогда выбранное решение не обязательно будет оптимальным. Действующие на построенных судах системы в среднем будут эксплуатироваться не менее 25 лет, что соответствует сроку службы судна. Такие методы снижения выбросов выхлопных газов как селективное каталитическое восстановление и эмульгирование воды уже используются на двухтактных двигателях некоторых известных фирм-производителей, например, MAN B&W.

До недавнего времени основное внимание экологических служб, в основном, было сосредоточено на NO_x и SO_x, но сейчас больше внимания уделяется компонентам выхлопных газов, таким как HC, твердые частицы, CO и CO_2.

Цель работы — путем исследования современных технических решений показать, что для решения практических задач экологии необходим комплексный подход, который позволит разрабатывать рациональные схемы современных судовых пропульсивных установок для их соответствия требованиям безопасности техногенных и природных систем.

Материалы и методы. В данной работе использовались расчетные соотношения, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям IMO [1–3]. Собственные исследования и наблюдения по сокращению количества выбросов парниковых газов (ПГ) с учетом режимов работы генерирующих установок приведены в [4]. Учитывался опыт и рекомендации ведущих зарубежных фирм и отечественных предприятий-производителей судового механического и электромеханического оборудования, их новейшие и перспективные разработки в части компоновочных решений и разработки отдельных элементов [5, 6].

Результаты исследований. Для оценки перспектив возможного развития судовых пропульсивных установок рассмотрим ее обобщенную схему (рис. 1).

В общем случае судовая пропульсивная установка имеет главный двигатель (ГД), дизельные генераторы (ДГ) и валогенератор/двигатель (ВГ/Д). В качестве гребной электрической установки (ГЭУ) используют винторулевые колонки (ВРК) и системы «Азипод»; редуктор (Р); солнечные батареи (СБ); аккумуляторные батареи (АБ); топливные элементы (ТЭ) (водородные или аммиачные по принципу действия как водородные); главный распределительный щит (ГРЩ); подруливающее устройство (ПУ); преобразователь частоты (ПЧ) и топливные танки (ТТ).

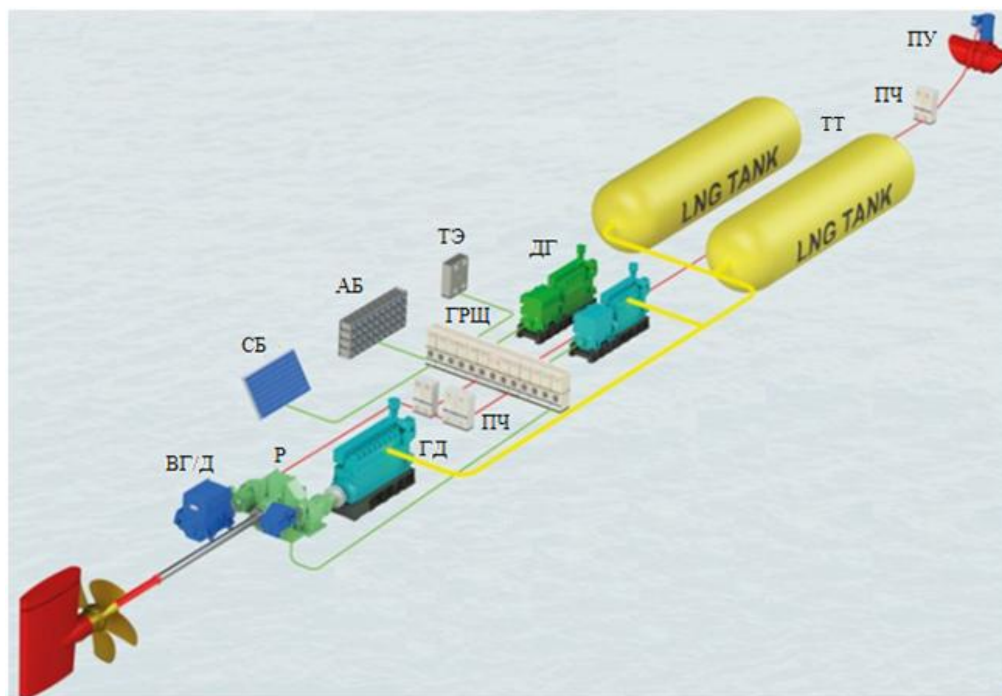


Рис. 1. Обобщенная судовая пропульсивная установка

Для выполнения исследований следует определиться с первичными двигателями. Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046 представлены на рис. 2.

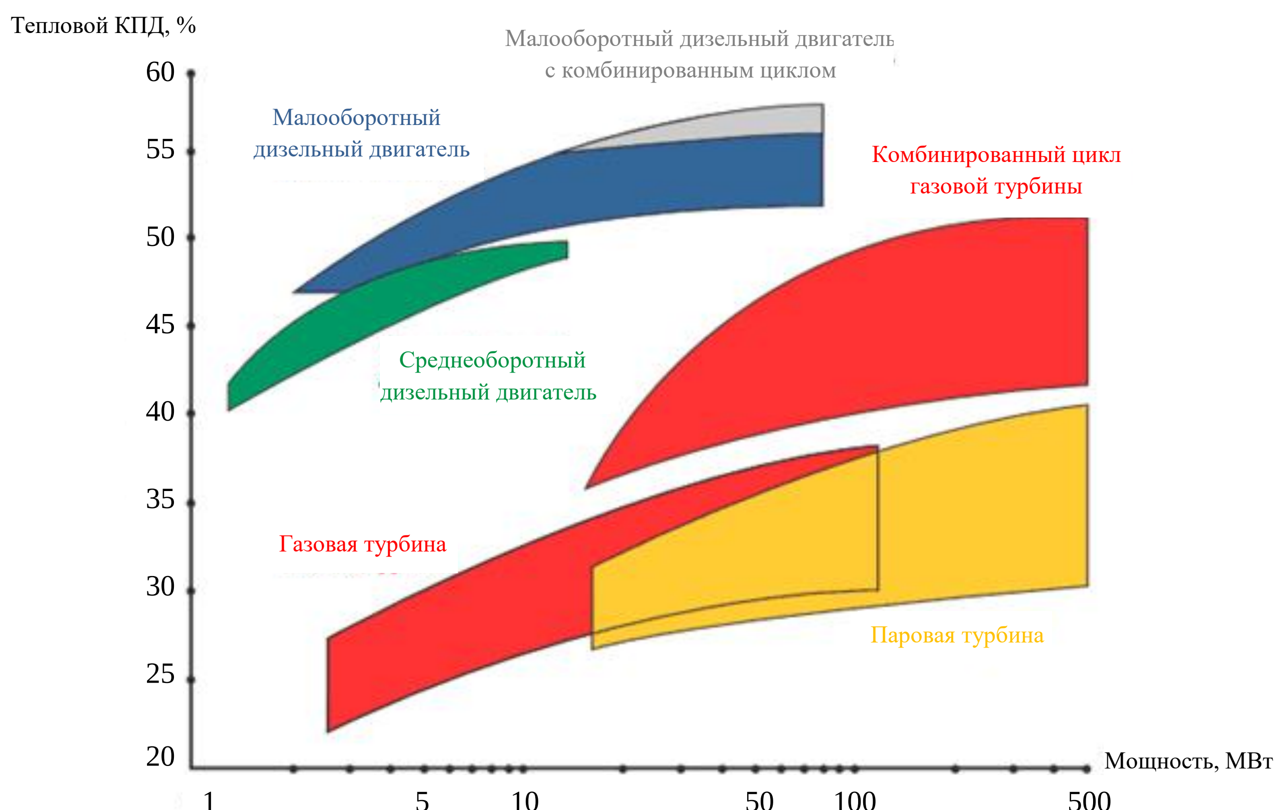


Рис. 2. Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046

Мощность ГД в соответствии с [1] определяется следующим образом:

$$N = a \cdot D_{wt} + b\,, \tag{1}$$

где *a, b* — значения коэффициентов уравнения для разных типов судов; D_{wt} — дедвейт судов, тыс. т. Значения составляющих *a, b* для соотношения (1) приведены в таблице 1.

В настоящее время выбор какого-либо из способов движения (дизель-механический, дизель-электрический, комбинированный с применением аккумуляторных батарей) будет зависеть от его эффективности, определяемой КПД.

Таблица 1

Параметры *a* и *b*, необходимые для определения минимальной мощности главных двигателей различных типов судов [1]

№	Типы судов	*a*	*b*
1	Балкеры DWT (менее 145000 т)	0,0763	3374,3
	Балкеры DWT (более 145000 т)	0,049	7329
2	Балкеры DWT (менее 75825 т)	0,0606	4195,2
	Балкеры DWT (более 275825 т)	0,0273	13366,0
3	Газовозы DWT (менее 29025 т)	0,23	793,6
	Газовозы DWT (более 129025 т)	0,0097	29224,0
4	Контейнеровозы DWT (менее 92186 т)	0,5843	0,0
	Контейнеровозы DWT (более 92186 т)	0,054	48886,0
5	Танкеры	0,0602	5495,5
6	Суда для перевозки генеральных грузов	0,152	2399,5
7	Рефрижераторные	0,9809	-1831,2

Одним из важных экологических показателей является количество выбросов NO_x с морских судов. Этот показатель представлен на рис. 3.

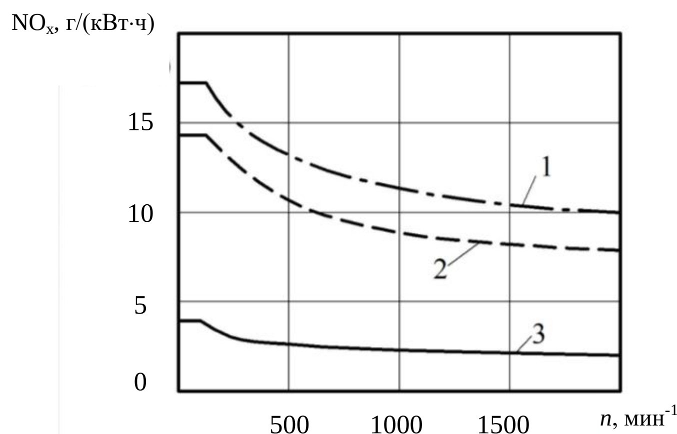


Рис. 3. Нормы выбросов NO_x с морских судов: 1 — уровень I (ГД > 130кВт, новые суда с 2000 г.); 2 — уровень II (ГД > 130кВт, новые суда с 2011 г.); 3 — уровень III (ГД > 130кВт, новые суда с 2016 г. в зонах контроля выбросов Emission control areas (ECA): Западное и Восточное побережье США, страны Северной Европы)

Как следует из рис. 3, при частотах вращения 100 об/мин., что является типовым для малооборотных (МОД) ГД, выпускаемых фирмами MAN B&W и WÄRTSILÄ-SULZER, уровень выбросов NO_x остается постоянным. Для ГД с частой вращения 250 об/мин., которая является типовой для фирмы Mitsubishi выбросы значительно снижаются. Наибольшее снижение достигается при частотах вращения в диапазоне 350–2500 об/мин. (данный диапазон является характерным для средне- и высокооборотных ГД (СОД и ВОД соответственно), что является весомым аргументом для перехода на ГЭУ [4]).

В настоящее время одним из способов снижения выбросов NO_x является установка на ГД селективного каталитического редуктора (СКР). Основные и перспективные схемы установки СКР представлены на рис. 4.

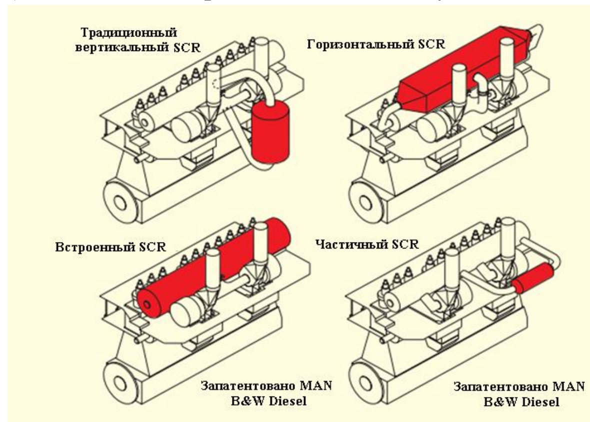


Рис. 4. Основные и перспективные схемы установки селективного каталитического редуктора

Эффективность установки селективных каталитических редукторов приведена в таблице 2.

Таблица 2

Эффективность установки селективных каталитических редукторов

Тип двигателя	Режим работы	Тип выбросов	Показатель эффективности, %
6S35MC	только движение	NO_x снижение	выше 93
6S50MC			93-95
9K80MC-Gl-S	движение и генерация		выше 93
4L35MC-S			выше 93
2x7K60MC-S			выше 93

На рис. 5 представлена количественная оценка выбросов NO_x в зависимости от нагрузки на дизель при переходе на водотопливную эмульсию [6].

Кроме ограничений по выбросам NO_x, с 2020 г. вступили в силу новые требования, серьезно ограничивающие допустимый уровень выбросов окислов серы, азота и ПГ в Балтийском, Северном и Средиземном морях (рис. 6) [1–3].

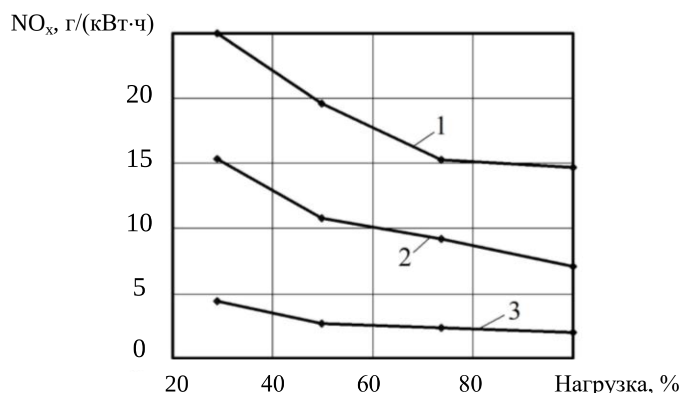


Рис. 5. Снижение выбросов NO_x при переходе на водотопливную эмульсию:
1 — дизельное топливо; 2 — метанол; 3 — метанол с водой [6]

Расширение зон экологического мониторинга морского транспорта и принятие мер по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду требуют от судовладельцев кардинальных решений по данному вопросу. При этом не существует универсального подхода и универсальных технических решений для конкретных типов морских судов.



Рис. 6. Зоны контроля выбросов с судов в Северной Америке и Северной Европе [3]

Снижение эмиссии ПГ должно определяться в соответствии с поправкой к Приложению VI к МАРПОЛ 73/78, вступившей в силу 1 января 2013 года, при помощи индекса энергоэффективности (EEDI), который характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии и определяется в соответствии с [1]:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\cdot\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}\cdot C_{FME(i)}\cdot SFC_{ME(i)}\right)+\left(P_{AE}\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)+}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_{ref}\cdot f_w}$$

$$\frac{+\left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\cdot\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}-\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{AEeff(i)}\right)\cdot C_{FAE}\cdot SFC_{AE}\right)-\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)}\cdot P_{eff(i)}\cdot C_{FME}\cdot SFC_{ME}\right)}{f_i\cdot f_c\cdot Capacity\cdot v_{ref}\cdot f_w}, \quad (2)$$

где *SFC* — удельный расход топлива двигателя, г/кВт час; C_F — безразмерный переводной коэффициент между расходом топлива в двигателе и выбросами CO_2, определёнными по содержанию углерода в конкретном топливе (грамм CO_2 / грамм топлива). Информация о содержании углерода в различных видах топлива и удельных выбросах CO_2 представлена в [1, 3] и таблице 3; P_{MEi} — показатель мощности каждого главного двигателя, равный 75% от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (в случае его наличия); P_{AE} — показатель требуемой мощности вспомогательных двигателей для обеспечения электроэнергией при максимальной загрузке судна; P_{PTI} — показатель, равный 75% номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электродвигателем с учётом механических потерь в нем и без учёта потерь в генераторе; P_{AEeff} — показатель сокращения электрической энергии за счёт использованию энергоэффективных технологий (использование отходящего тепла ГД), которые в [1] называют инновационными.

В работе [4] отмечается, что устойчивая работа данных систем возможна только при частоте вращения ГД 40–50 % от номинальной; P_{eff} — показатель сокращения мощности ГД за счёт применения инновационных технологий в пропульсивной установке при 75 % мощности ГД (фотоэлектрические установки, топливные элементы, ветрогенераторы). В [4] показано, что применение инновационных технологий позволяет повысить

индекс энергоэффективности, но они не оказывают решающего влияния на их выбор в качестве основных источников по причине их малой мощности в десятки-сотни кВт; f_i — фактор, учитывающий необходимость выполнения требований по ограничению вместимости судна, например требований которые применяются к судам ледового класса; f_j — корректирующий фактор, учитывающий специфическую конструкцию элементов судов, например, судов ледового класса; f_w — безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости при определённом неблагоприятном состоянии моря в зависимости от высоты и частоты волны, а также от скорости ветра; f_{eff} — коэффициент доступности каждой инновационной технологии; V_{ref} — скорость судна, измеренная на глубокой воде с учётом соответствующей вместимости (дедвейт или валовая вместимость в зависимости от типа судна). Более детально с расчетом коэффициентов f_i, f_j, f_w и f_{eff} можно ознакомиться в [2].

В таблице 4 дан сравнительный анализ применения различных видов топлива для судовых ГД и аккумуляторных систем, а также снижение эмиссии по сравнению с мазутом для уровня II [5].

Переход к LPG и LNG позволит увеличить мощность ДВС при внесении незначительных изменений в систему подачи топлива в соответствии с выражением [6]:

$$N_{\text{НОМ.ГАЗ}} = N_{\text{НОМ.ДИЗ}} \cdot \left(\frac{C_{\text{F,ДИЗ}} \cdot \text{НТС}_{\text{ГАЗ}}}{C_{\text{F,ГАЗ}} \cdot \text{НТС}_{\text{ДИЗ}}} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где $N_{НОМ.ДИЗ}$ — номинальная мощность на дизельном топливе, кВт; C_F — безразмерный коэффициент между расходом топлива в двигателе и выбросами CO_2, определенными по содержанию углерода в конкретном топливе (г CO_2 / г топлива); *НТС* — низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Таблица 3

Содержание углерода в различных видах топлива и удельные выбросы CO_2 [2]

Тип топлива	Ссылка	Низшая теплотворная способность, кДж/кг	Содержание углерода	C_F, т CO_2/т топлива
Дизельное/газойль	ISO 8217, сорта от DMX до DMB	42,7	0,8744	3,206
Легкое жидкое топливо (ЛЖТ)	ISO 8217, сорта от RMA до RMD	41,2	0,8594	3,151
Тяжелое жидкое топливо (ТЖТ)	ISO 8217, сорта от RME до RMK	40,2	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ (СНГ)	пропан	46,3	0,8182	3,0
	бутан	45,7	0,8264	3,03
Сжиженный природный газ (СПГ)		48	0,75	2,75
Метанол		19,9	0,375	1,375
Этанол		26,8	0,5217	1,913

Таблица 4

Сравнение альтернативных видов топлива для судовых ДВС и аккумуляторных систем

Типы топлива и источники	Удельная энергия, МДж/кг	Плотность энергии, МДж/л	Соответствующие емкости, м^3	Давление нагнетания, бар	Давление впрыска, бар	Снижение эмиссии по сравнению с мазутом в соответствии с уровнем II		
Мазут (HFO)	40,5	35	1,0	7-8	950	SO_x	NO_x	CO_2
Сжиженный газ (LNG-162°C)	50	22	1,59	300/Метан 380/Этан	300/Метан 380/Этан	90-99 90-97	20-30 30-50	24 15
Сжиженный газ (LPG (пропан/бутан))	42	26	1,35	50	600-700	90-100	10-15	13-18
Метанол (древесный спирт)	18	15	2,33	10	500	90-97	30-50	5
Этанол	26	21	1,75	10	500	-	-	-
Аммиак (сжиженный -33°C)	18,6	12,5	2,8	50	600-700	-	-	-
Водород (сжиженный -253°C)	142	10	3,5	-	-	-	-	-
Высокоэнергетическая морская батарейная система	0,5	0,54	64,8	-	-	-	-	-
Элементы Tesla 2170	0,8	2,5	14,0	-	-	-	-	-

Коснемся вопроса водородного топлива. Водород не содержится в чистом виде в природе и получать его можно из газообразных и жидких углеводородов или из воды. Это два наиболее распространенных и имеющих промышленное значение способа получения водорода [7]. Для успешной реализации проекта необходимо решить ряд проблем. Чтобы топливные элементы обеспечивали мощность 3МВт в течение 48 часов, требуется около 68 м^3 жидкого водорода, для хранения которого требуется намного больше места, чем для дизельного топлива. Для исключения утечек требуются специальные трубопроводы, а сам водород надо хранить при температуре ниже –253 °С. На рис. 7 представлена водородно-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-П мощностью 50,0 кВт для энергоустановок мегаваттного класса (Фото: «Крыловский государственный научный центр», ФГУП), а на рис. 8 — судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60кВт (Фото: ЦНИИ СЭТ).

В настоящее время одним из пионеров программы по испытанию судовых ДВС, работающих на чистом водороде, является фирма Wärtsilä (Финляндия). Концепция фирмы основана на сочетании сжиженного природного газа с паром для получения водорода и CO_2 [8].

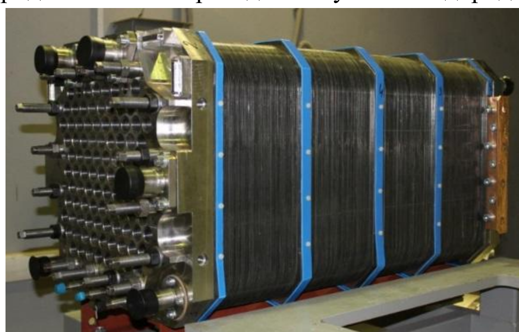


Рис. 7. Водородно-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-П мощностью 50 кВт для энергоустановок мегаваттного класса [9]



Рис. 8. Судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60 кВт/ [10]

Одним из важных показателей при выборе именно дизельных двигателей является его цена. Именно эти данные являются самыми необходимыми на этапе начальной проработки какого-либо проекта, хотя имеют «ограниченный» или «закрытый» характер. В [11] предложена формула для расчета цены судовых и промышленных дизелей, исходя из основных функциональных характеристик:

$$Ц = К \cdot \frac{N_e^{0,073} \cdot T^{0,086} \cdot M^{0,763}}{g_e^{2,446} \cdot g_m^{1,138} \cdot S^{0,466}}, \tag{4}$$

где N_e — номинальная эффективная мощность двигателя, кВт; M — масса, кг; g_e — удельный расход топлива для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч); g_m — удельный расход масла для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч); S — серийность выпуска, шт.; $К$ — коэффициент пропорциональности, равный 0,023; T — ресурс до первой переборки, ч.

Показатели степени характеризуют весомость каждого аргумента в формуле. Порядок величин, входящих в (4), приводится в соответствующей нормативно-технической документации. Информация об удельных расходах топлива МОД, СОД и ВОД представлена в [4].

Анализ [5] показывает, что в настоящее время значительный прогресс в развитии ПУ связан с использованием литий-ионных батарей. Но, несмотря на всю привлекательность с экологической точки зрения, он имеет ограниченный характер из-за значительных массогабаритных и ценовых показателей. При этом их можно использовать в комбинированных ГЭУ как совместно с дизель-генераторными установками, так и индивидуально.

Таблица 5

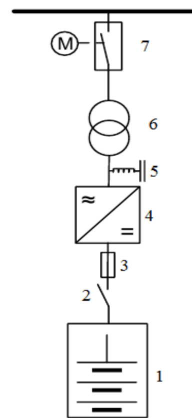
Удельная масса, объем и цена больших 1МВт·ч тяжелых литий-ионных батарей

Основные показатели	Уровень системы	Групповой уровень	Модульный уровень	Уровень элемента
Удельная масса, кг/кВт·ч	11–30	7–28	6–24	6–8
Удельный объем, 1/кВт	12–35	10–12	7–10	1,5–2,5
Удельная цена, USD/кВт·ч	500			200–250

В настоящее время фирмой MAN B&W разработан «твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux (рис. 9). Его технические характеристики приведены в [12] и таблице 6.



а)



б)

Рис. 9. «Твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux: *а* — внешний вид; *б* — состав генератора: 1 — накопитель энергии (АБ); 2 — выключатель; 3 — система защиты; 4 — двунаправленный инвертирующий преобразователь; 5 — фильтр; 6 — разделительный трансформатор; 7 — выключатель с моторным приводом

Таблица 6

Технические характеристики «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux

Типоразмер	Напряжение сети, В	Частота, Гц
625 кВт·ч (5С)*	400-690	50 или 60
405 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
270 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
135 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60

* С — скорость заряда. С = 12 мин., т. е. 5С=5·12=60 мин.

Возможные компоновочные решения по размещению электромеханического оборудования в машинном отделении в случае применения ГЭУ при питании ДВС от газообразных источников приведены в [6, 8], а для систем, в состав которых входят аккумуляторные батареи — в [5, 13].

Обсуждение и заключения.

1. Одним из эффективных способов повышения безопасности техногенных и природных систем за счет снижения выбросов NO_x является установка на ГД селективных каталитических редукторов (СКР), которые позволяют снизить количество выбросов NO_x до 93–98 % в зависимости от применяемой схемы. Переход к СНГ и СПГ позволит увеличить мощность ДВС на 22,6–49,6 % при внесении в его конструкцию незначительных изменений.

2. Существующие инновационные технологии производства электрической энергии на борту судна, такие как солнечные батареи, ветрогенераторы и т. д., имеют незначительную мощность порядка 10^2 кВт. Работа системы по утилизации тепла и валогенератор начинают устойчиво работать только при частоте вращения 40–50% от номинальной. Они оказывают существенное влияние на индекс энергоэффективности, а, следовательно, и на снижение выбросов CO_2. Таким образом, они не могут претендовать на роль приводных двигателей генераторов. Основным источником при производстве энергии для ГЭУ в ближайшей перспективе останутся дизельные генераторы с углеводородными видами топлива.

3. Применение исключительно аккумуляторных систем имеет ограниченный характер ввиду значительных массогабаритных и ценовых показателей. Их возможности существенно могут быть расширены в сочетании с дизель-генераторами. Применение «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux открывает более широкие перспективы в этом вопросе.

4. В отдаленной перспективе водородные топливные элементы могут рассматриваться как реальная альтернатива углеводородным видам топлива, но экономические факторы будут ограничивать развертывание новой дорогостоящей инфраструктуры. Однако, если водород будет производиться непосредственно на борту, эта альтернатива дизельному топливу становится гораздо более привлекательной для инвесторов и пользователей.

Список литературы

1. Air pollution and energy efficiency. Background information to document MEPC 64/4/13. Submitted by the International Association of Classification Societies (IACS), 2012. ResearchGate : [сайт]. — URL : https://www.researchgate.net/publication/315642914_Background_information_to_document_MEPC_64413 (дата обращения : 30.03.2020).

2. МАРПОЛ. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов // docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/499014496 (дата обращения : 30.03.2020).

3. Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030101-026 / ФАУ «Российский морской регистр судоходства». — Санкт-Петербург, 2017. — 163 с.

4. Труднев, С. Ю. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: Судовые источники электрической энергии. Часть I / С. Ю. Труднев, А. Н. Рак, А. А. Марченко. — Новокузнецк : Знание-М, 2021. — 188 с.

5. MAN Energy Solutions. Batteries on board ocean-going vessels // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf (дата обращения : 22.03.2020).

6. MAN Energy Solutions. MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/technical-papers/2 (дата обращения : 22.03.2021).

7. Радченко, Р. В. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 229 с.

8. Wärtsilä разрабатывает систему для производства водородного топлива на борту кораблей // building-tech.org : [сайт]. — URL: https://building-tech.org/Технологии/wärtsilä-razrabativaet-systemu-dlya-proyzvodstva-vodorodnogo-toplyva-na-bortu-korabley (дата обращения : 22.03.2022).

9. В 2023 году мы сможем представить первое полноценное судно на водородном топливе // korabel.ru : [сайт]. — URL : https://www.korabel.ru/news/comments/v_2023_godu_my_smozhem_predstavit_pervoe_polnocennoe_sudno_na_vodorodnom_toplive.html (дата обращения: 22.03.2022).

10. Суда на водороде — уже реальность // korabel.ru : [сайт]. — URL : https://www.korabel.ru/news/comments/vodorod_na_flote_uzhe_davno_ne_fantaziya_kak_v_rossii_razvivaetsya_vodorodnaya_energetika.html (дата обращения: 22.03.2022).

11. Дорохов, А. Ф. Качество и надёжность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов, А. Г. Проватар, А. В. Воробьёв // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 2. — С. 48–55.

12. MAN Energy Solutions. MAN Hybrid EcoAux // man-es.com : [сайт]. — URL : https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-hybrid-ecoaux-eng.pdf?sfvrsn=98d91b1c_0 (дата обращения : 22.03.2022).

13. Обзор конструкций тяговых аккумуляторных батарей, применяемых на шахтных электровозах / В. О. Гутаревич, К. А. Рябко, Е. В. Рябко, В. А. Захаров // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 2. — С. 109–118.

Поступила в редакцию 29.09.2022
Поступила после рецензирования 10.10.2022
Принята к публикации 10.10.2022

Об авторе:

Рак Александр Николаевич, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Камчатского государственного технического университета (683003, РФ, Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35), кандидат технических наук, ORCID, lion15ua@rambler.ru

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.